

doi: 10.7690/bgzdh.2014.11.018

基于模糊 PID 的铝空气电源双向 DC-DC 变换器

胡东杰, 赵军红, 蔡艳平, 徐斌
(第二炮兵工程大学五系, 西安 710025)

摘要: 针对双向 DC-DC 变换器在铝空气电源工作模式切换时的非线性问题, 设计一种用于铝空气电源储能系统的双向 DC-DC 变换器。在传统 PID 控制的基础上, 引入模糊控制, 构成模糊 PID 电压环和 PI 电流环双闭环控制。并在 Matlab/Simulink 中, 对比分析了双向 DC-DC 变换器模型、传统 PID 双闭环模型和模糊 PID 双闭环模型。实验仿真结果表明: 与传统 PID 控制方法相比, 该控制方法能够有效解决双向 DC-DC 变换器的非线性问题, 提高升降压速度, 减小输出电压和电流的波动。

关键词: 铝空气电源; 双向 DC-DC 变换器; 模糊 PID 控制器

中图分类号: TP302 **文献标志码:** A

Aluminum Air Power Bidirectional DC-DC Controller Based on Fuzzy PID

Hu Dongjie, Zhao Junhong, Cai Yanping, Xu Bin

(No. 5 Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: For the nonlinear problems of bidirectional DC-DC converter in switching supply mode of aluminum air power, a bidirectional DC-DC converter used for aluminum air power storage system was designed. Fuzzy control based on traditional PID control was brought in to constitute a double loop control consists of fuzzy PID voltage loop and PI current loop. And in Matlab/Simulink, the bi-directional DC-DC converter model, the traditional double closed loop PID model and the fuzzy double loop PID model were compared and analyzed. The simulation result shows that, compared with the traditional PI control method, this control method can effectively solve the nonlinear problems of bidirectional DC-DC converter, improve the speed of step-up and step-down, and reduce the wave of voltage and current output.

Keywords: aluminum air power; bidirectional DC-DC controller; fuzzy PID controller

0 引言

近年来, 双向 DC-DC 变换器在电动汽车系统、能源储存系统、UPS 系统和燃料电池发电等领域得到了广泛应用。铝空气电源采用铝空气电池和蓄电池混合供电。其中双向 DC-DC 变换器承担着能量双向传输的任务, 即实现铝空气电源和蓄电池之间协调匹配的核心是双向 DC-DC 变换器的控制^[1]。

随着现代控制理论的发展, 非线性控制在电力电子变换器的控制中具有广泛的应用前景, 如滑模控制、模糊控制、反馈线性化、无源控制、神经网络和智能控制等。文献[2]针对双向 DC-DC 变换器的混杂特性, 根据混杂自动机理论建立变换器在 Buck 和 Boost 2 种工作方式下的混杂自动机模型, 该控制算法能够实现电感电流连续和电感电流断续全范围内的稳定运行, 同时对负载扰动和输入电压扰动具有出色的抑制能力。文献[3]分析了传统逆变器与双向 DC-DC 变换器的非线性特点, 提出分别应用反馈线性化控制和高阶滑模控制 2 种方法的新型直流变换器和逆变器, 解决 DC-DC 变换器和传

统的逆变器的非线性问题。文献[4]针对变换器的非线性问题, 结合滑模控制器和滑模变结构控制器的优点, 利用二者切换的控制方法, 获得了较好的鲁棒性和快速性。

上述方法虽然能较好地解决了系统的非线性问题, 但控制器结构过于复杂, 实际应用比较困难。鉴于模糊控制在解决非线性问题中的优势, 结合 PID 控制的特点, 笔者提出采用模糊 PID 电压环和 PI 电流环双闭环对双向 DC-DC 进行控制, 电压环控制保证输出电压及时跟随给定值, 电流环能有效减少输出电流的尖峰和纹波, 提高升降压速度。

1 双向 DC-DC 工作原理和模式选择

1.1 工作原理

铝空气电池和蓄电池混合供电系统如图 1。

文中双向 DC-DC 变换器采用 Buck-boost 拓扑结构, 该变换器由单向 Boost 变换器和单向 Buck 变换器组成, 该双向 DC-DC 变换器拓扑结构如图 2 所示。开关管 K_1 和 K_2 采用全控型绝缘栅双极晶体

收稿日期: 2014-06-03; 修回日期: 2014-07-24

作者简介: 胡东杰(1988—), 男, 陕西人, 在读硕士, 从事机电系统控制及仿真研究。

管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT), D_1 和 D_2 为不同工作模式下的续流二极管。图中 U_1 为电池侧端电压, C_1 为电池侧滤波电容, U_2 为直流母线电压, C_2 为母线电容, 为母线电压提供电压支撑, 并为开关管的关断提供缓冲, L 为储能电感^[5-6]。

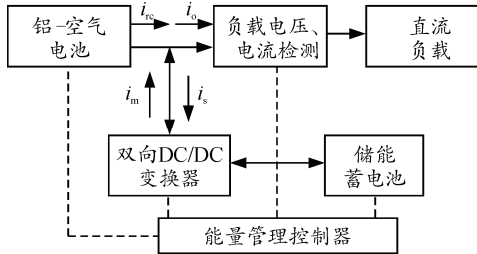


图 1 铝空气电池和蓄电池混合供电系统

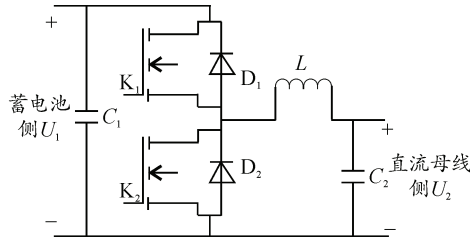


图 2 Buck-boost 双向 DC-DC 变换器

1.1.1 升压模式

当铝空气电源处于非峰值负载时, 需要给蓄电池充电, 直流母线电压无法满足要求, 双向变换器需要运行在升压模式。当开关管 K_2 导通时, 开关管 K_1 关断, 2 个二极管 D_1 和 D_2 承受反向压降关断, 直流母线给电感 L 充电储能; 当开关管 K_2 关断时, 电源和电感共同给蓄电池充电, 电容 C_1 起到支撑电压和滤波的作用。

1.1.2 降压模式

当铝空气电源处于峰值负载时, 需要蓄电池放电, 补充铝空气电源给负载供电, 双向变换器需要运行在降压模式。当开关管 K_1 导通时, 开关管 K_2 关断, 2 个二极管 D_1 和 D_2 承受反向压降关断, 蓄电池放电, 同时给电感 L 充电储能; 当开关管 K_1 关断时, 电感电流经 D_2 构成续流回路, 电感对母线传送能量, 电容 C_2 起到支撑电压和滤波的作用。

1.2 工作模式选择

为了保证铝空气电源能可靠稳定和高效工作, 就必须保证铝空电池和蓄电池协调工作。通过检测直流母线电压和蓄电池端口电压, 确定铝空气电池和蓄电池的实时状态, 来控制系统能量的流动方向, 使双向变换器工作在 Boost、Buck 和停机这 3 种模

式。以此来对蓄电池进行合理充放电, 使蓄电池和铝空气电池协调工作。

2 系统控制结构和控制器设计

2.1 系统控制结构

双向 Buck-boost DC-DC 变换器采用电压-电流双闭环控制结构, 如图 3 所示。电压环控制器根据电压设定与输出电压之间的偏差, 实时调节电流设定, 电流环控制器控制脉宽调制信号, 使输出始终跟随给定, 稳定输出电流和电压。采用电压-电流双闭环控制模式可以保证 DC-DC 变换器的输出电压、电流保持在一个稳定的范围内, 在降压过程中, 能有效地减少直流母线的电压电流纹波; 在升压过程中, 使变换器输出电压电流平稳, 减少电流波动对电池充电性能的不利影响。由于传统的线性控制往往达不到预期效果, 但模糊控制可动态修正控制器参数, 提高系统对非线性的自适应能力, 因此电压环选择模糊 PID 控制器, 电流环选择 PI 控制器^[7-8]。

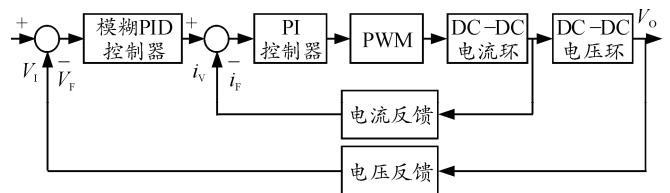


图 3 电压-电流双闭环控制系统结构

2.2 模糊 PID 控制器设计

2.2.1 模糊 PID 控制器系统结构

PID 控制器是 1 种线性控制器, 它根据给定值与实际输出值构成控制偏差。将偏差的比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 通过线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制。其控制规律为:

$$u(t) = k_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_D de(t)}{dt}] \quad (1)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

式中: k_p 比例系数; T_i 积分时间常数; T_D 微分时间常数。

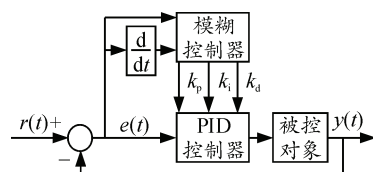


图 4 参数自整定模糊控制系统结构图

笔者利用模糊推理的方法实现对 PID 参数进行

在线整定^[9]，其系统结构如图 4 所示。

2.2.2 选取输入和输出量

双向 DC-DC 变换器输出电压的偏差及偏差变化率作为模糊控制器的输入变量，PID 控制器的参数 k_p 、 T_i 和 k_d 由模糊控制器实时修正，修正公式如下：

$$\left. \begin{aligned} k_p &= k_{p0} + \Delta k_p \\ T_i &= T_{i0} + \Delta T_i \\ k_d &= k_{d0} + \Delta k_d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2.3 模糊规则的确定

模糊控制器输入误差 E 、误差变化率 E_C 输出的 K_P 、 K_I 、 K_D 论域都定义为： $a = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ；模糊输入变量 E 、 E_C 及输出变量 K_P 、 K_I 、 K_D 的模糊子集均为： $A = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ；为了方便设计，取输入 E 、 E_C 及输出 K_P 、 K_I 、 K_D 的隶属函数均为三角型函数。模糊规则为“if... then...”条件语句。针对比例参数调整共 49 条模糊规则，同理，对积分系数和微分系数类似，具体的模糊参数控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊参数控制规则

E_C	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/ZO	NM/PB/ZO
PM	PS/ZO/PB	ZO/ZO/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

3 实验与仿真结果分析

为了验证上述双向 DC-DC 控制器有效性，在 Matlab/Simulink 中，利用 Fuzzy 工具箱和 Simpowersystem 工具箱建立双向 DC-DC 变换器模型、传统 PID 双闭环模型和模糊 PID 双闭环模型^[9-10]，并对控制效果进行对比分析。该电路模型的具体参数如下：蓄电池侧 U_1 电压 36 V；直流母线侧 U_2 电压

28 V；电容 C_1 和 C_2 均为 230 μ F；电感 $L=20\ 000\ \mu$ H。

3.1 电压环 PID，电流环 PI 双闭环控制

仿真条件：负载电阻 5 Ω ，电压环控制器 $k_p=1.5$ ， $T_i=0.1$ ， $k_d=3$ 。电流环控制器 $k_p=0.5$ ， $T_i=0.01$ ，算法采用 od23，仿真时间 0.2 s，仿真结果如图 5 和图 6 所示。

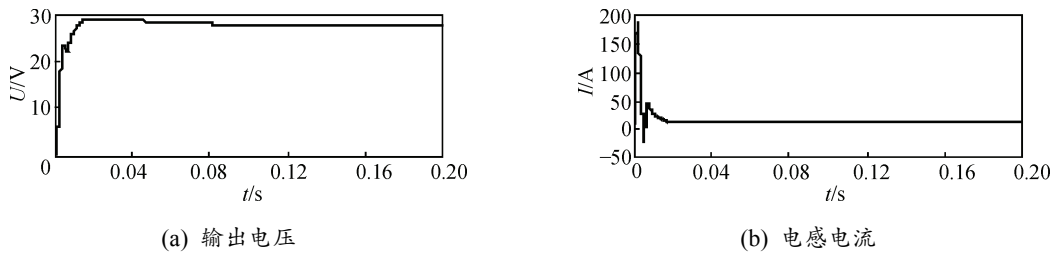


图 5 Buck 模式下双向 DC-DC 输出电压和电感电流

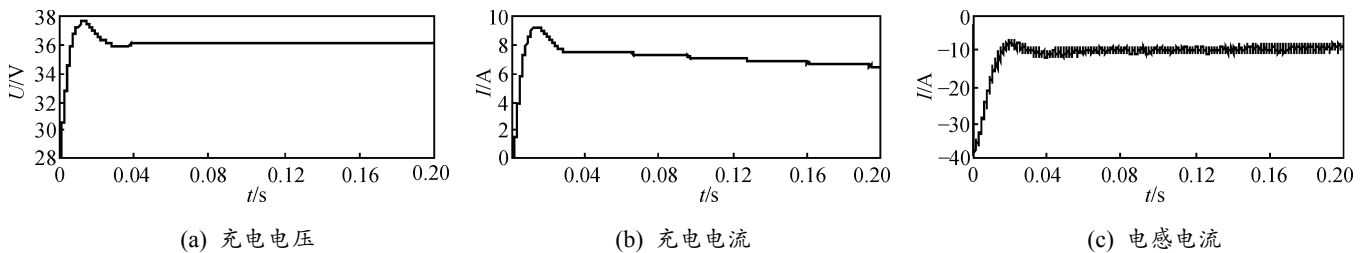


图 6 Boost 模式下蓄电池充电电压电流和电感电流

3.2 电压环模糊 PID 控制，电流环 PI 控制

仿真条件相同，只是电压环控制器采用模糊 PID 控制器，电流环采用 PI 控制器，仿真结果如图 7 和图 8 所示。

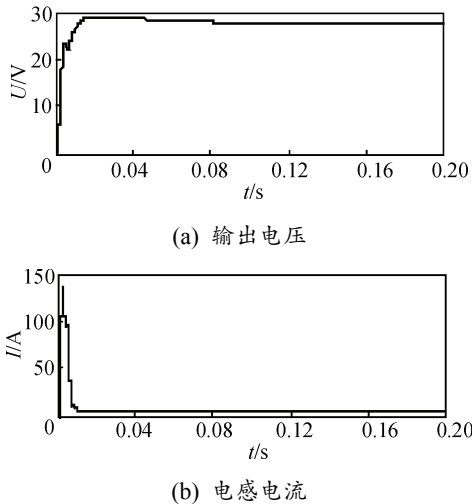


图 7 Buck 模式下的输出电压和电感电流

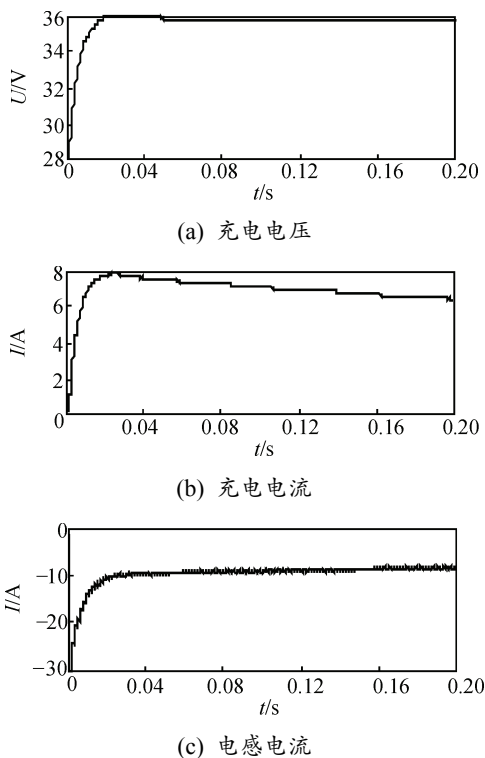


图 8 Boost 模式下蓄电池的充电电压电流和电感电流

由图 5 和图 6 可知：1) 升压和降压的动态过程中电压有一定震荡，且都出现了超调，降压为 7.1%，升压为 5.5%；2) 电感电流和升压过程的充电电流都出现了尖峰，对蓄电池的性能有不利影响；3) 达

到稳定电压的时间较长，降压时需要 0.08 s，升压时需要 0.04 s；4) 输出电压和电感电流纹波较多。

由图 7 和图 8 可知，模糊 PID 控制能很好地解决功率变换系统的非线性问题：1) 升压和降压过程比较平稳，无明显震荡，没有超调；2) 动态响应速度快，达到稳态电压的速度快，降压仅需 0.02 s，升压仅需 0.03 s；3) 电感电流和升压时充电电流无峰值，有效地维护了蓄电池的性能；4) 双向 DC-DC 变换器输出电压和电流的波动减小。

4 结束语

笔者设计了用于铝空气电源储能系统的双向 DC-DC 变换器，其控制器采用电压外环模糊 PID 控制和电流内环 PI 控制。实验仿真结果表明，与传统 PID 双闭环控制比较，该控制器解决了功率变换系统的非线性问题，提高了升降压速度，减少了输出电压电流的纹波，有利于铝空气电池和蓄电池协调工作。

参考文献：

- [1] 刘岳滨, 赵军红, 胡东杰. 新型铝空气电池管理系统设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 116-119.
- [2] 马红波, 冯全源. Buck-boost 开关变换器的混杂建模与控制研究[J]. 2008 年全国博士生学术论坛电气工程论文集. 成都, 2008: 926-935.
- [3] Vadim Utkin. Sliding mode control of DC/DC converters[J]. Journal of the Franklin Institute, 2013, 35(8): 121-127.
- [4] 胡雪峰, 龚春英. 适用于光伏/燃料电池发电的组合式直流升压变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 8-15.
- [5] 罗凌. 基于 DSP 控制的大功率开关电源抗干扰设计[J]. 兵工自动化, 2013, 41(12): 36-38.
- [6] 孙文, 林平, 卢冶, 等. 用于电动汽车的双向 DC/DC 变换器控制设计[J]. 电力电子技术, 2012, 46(7): 40-42.
- [7] 郭正玉, 梁晓庚. 弹道修正弹模糊自适应 PID 控制器设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 104-106.
- [8] 张向南, 周丽娟, 李全俊. 模糊自适应 PID 在气液增力缸压力控制中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 71-74.
- [9] Zhang Junhong. Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control[D]. Virginia: the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008: 3.
- [10] 龙佼佼, 吴景林, 刘小宁, 等. 有源电力滤波器中双向快速充放电 DC/DC 变换器设计及仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1792-1797.